



지하 액화 수소충전소의 위험식별분석(HAZID)에 관한 연구

Study on Hazard Identification (HAZID) for Subterranean Liquefied Hydrogen Refueling Stations

윤웅기* · 김양균** · 황인주*** · 박병직****

Yoon, Ung-Gi*, Kim, Yangkyun**, Hwang, Inju***, and Park, Byoungjik****

Abstract

To reduce carbon emissions globally, hydrogen fuel has emerged as a promising contender for environmentally sustainable energy transport and storage. However, hydrogen possesses several inherent safety challenges such as its propensity for rapid diffusion, a broad flammability range when mixed with air, and hydrogen embrittlement, a phenomenon where hydrogen diffuses into metals, compromising their structural integrity. Consequently, safety considerations are paramount. This study presents a hazard identification (HAZID) analysis to evaluate the feasibility of a subterranean liquid hydrogen refueling station as an alternative to conventional above-ground gaseous hydrogen refueling stations. Through this analysis, four representative accident scenarios were identified, and 17 mitigation recommendations were proposed. The implementation of these recommendations is anticipated to significantly reduce the potential for accident-related damage in subterranean liquid hydrogen refueling stations.

Key words : Hydrogen Safety, Hazard Identification (HAZID), Hydrogen Refueling Station, Underground Space, Liquid Hydrogen

전 세계적으로 탄소를 저감하기 위하여 노력하고 있으며, 친환경 에너지를 운반·보관하는데 수소 에너지를 일부 사용하고 있다. 그러나 수소가스는 확산성이 매우 빠르고, 공기와 혼합하면 폭발범위가 매우 넓고, 금속 내부로 확산되어 금속을 파괴시키는 취성을 갖고 있기 때문에 높은 안전성이 요구되고 있다. 본 연구에서는 기존의 지상 기체수소충전소를 지하 액화수소충전소를 제안하기 위하여 위험식별분석(HAZID)을 수행하였다. 4개의 대표 사고 시나리오를 설정하였으며, 17개의 권고사항을 제시하였다. 이를 통하여 지하 액화 수소충전소의 사고피해를 저감할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 수소안전, 위험식별분석, 수소충전소, 지하 공간, 액화수소

1. 서 론

수소에너지는 친환경에너지 중 하나로서 에너지 운반체로서 탄소중립에 크게 기여할 것으로 예상된다(Jossie and Daniela, 2024). 기체수소충전소와 수소연료 전기자동차(Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV)를 중심으로 수소제트누출(Hydrogen Jet Release) (Park et al., 2021), 제트화염(Jet

Fire) (Park et al., 2023), 폭발(Explosion) (Park and Kim, 2023) 등의 사고에 대한 안전설계 및 대응기술을 확보하기 위한 연구가 진행되었으며, 산업통상자원부는 청정수소 중심의 수소산업 육성을 위해 안전기준 개발, 규제혁신, 안전관리 역량강화를 주제로 하는 ‘수소안전관리 로드맵 2.0’ (Ministry of Trade, Industry and Energy, 2023)을 발표하였다. 액화수소는 기체수소를 극저온 상태인 영하 253 ℃로

*정회원, 한국건설기술연구원 화재안전연구소 박사후연구원(E-mail: yoonunggi@kict.re.kr)
Member, Postdoctoral Researcher, Department of Fire Safety Research, KICT

**한국건설기술연구원 화재안전연구소 수석연구원
Senior Researcher, Department of Fire Safety Research, KICT

***한국건설기술연구원 환경연구본부 선임연구위원
Senior Research Fellow, Department of Environmental Research, KICT

****교신저자, 정회원, 한국건설기술연구원 화재안전연구소 수석연구원(Tel: +82-31-369-0504, Fax: +82-31-369-0555, E-mail: templer83@kict.re.kr)
Corresponding Author, Member, Senior Researcher, Department of Fire Safety Research, KICT

냉각하여 액화한 형태이며, 기체수소에 비해 부피가 약 1/800로 줄어들어 저장용기를 약 1/8~1/10 크기로 사용이 가능하며 저장 및 운송 부분에 경제성을 갖고 있다(Fusaro et al., 2020). 또한, 기체수소는 20~100 MPa로 압축되어 사용되며, 누출 시 확산 속도가 빠르고 최소발화에너지가 낮아서 폭발의 위험성을 갖고 있지만 액화수소는 0.1~0.4 MPa로 운영되어 누출 시 무화되는 경우에는 점화시 Jet Fire, 바닥에 Pool 형성시 점화 되는 경우에는 액면 화재(Pool Fire)가 발생할 수 있으며, 밀폐공간에서 액화수소가 빠르게 기화하여 증기운 폭발(Vapor Cloud Explosion, VCE)이 발생하거나 액체수소 용기가 외부로부터 유입되는 열에 의해 물리적 폭발이 순간적으로 화학적 폭발로 이어지는 비등액체팽창 증기폭발(Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion, BLEVE)이 발생할 수 있다(Yoo et al., 2021).

HAZID (Hazard Identification)와 HAZOP (Hazard and Operability Study)은 모두 위험성 평가 방법론이지만, 그들의 목적과 적용 단계, 그리고 방법론에는 몇 가지 차이점이 있다. HAZID는 위험을 식별하는 것에 초점을 두며, 주로 프로젝트의 초기 단계나 위험 수준이 크게 변할 때 수행된다(The CPD Certification Service, 2023). 또한, HAZID는 프로세스 설계나 운영 단계 초기에 잠재적 위험을 식별하는데 목표를 두는 하향식 접근법이다. 공정흐름도(PFD), 열 및 질량 물질수지(Mass Balance), 플랜트 설비 배치 등이 제공되는 시점에 수행된다. HAZID는 사람, 환경, 자산 또는 기업에 영향을 미칠 수 있는 잠재적인 위험 및 위험을 조기에 식별할 수 있는 정성적인 기술이다. 반면에 HAZOP은 각 시스템 또는 프로세스의 개별요소에 초점을 맞춰 보다 상세하고 심층적으로 위험을 분석하는 방법론이다. HAZOP은 설계 중간단계와 지속적인 운영 단계에서 수행될 수 있으며, 따라서 HAZID 보다 더 세부적인 설계 데이터가 필요하다. HAZOP은 프로세스의 안전을 완전히 보증하는 것이 어렵기 때문에, 설비의 이상이나 운전조건의 변화 등에 의해 예기치 않았던 이상적인 운전상황이 발생한 경우를 대비하여 잠재되어 있는 위험성을 명확히 하고 단계적이고 체계적으로 필요한 안전성에 대한 대책을 마련하는 것이 필요하다(Sigma-HSE, 2023). 따라서 HAZID와 HAZOP은 각각의 목적과 적용 단계에 따라 선택되어 사용된다. 이 두 가지 방법론은 서로 보완적인 관계에 있으며, 프로젝트의 다양한 단계에서 위험성을 평가하고 관리하는 데 사용된다(Kizer Energy, 2023).

도심지에서 안전하게 수소에너지를 활용하고자 지하공간에 주요설비가 배치되는 지하 수소충전소가 제안되고 있으며, 본 논문에서는 지하 액화수소충전소를 설치하는 경우에 발생하는 위험 요소들을 확인하고자 HAZID 분석을 하였으며, 이를 통해 공정배관계장도(Process and Instrument Diagram, P&ID)와 3D 설계안을 제안하였다.

2. 지하 액화 수소충전소의 HAZID

2.1 HAZID 분석 개요

HAZID는 어떤 시스템 운용에 존재하는 위험요소를 식별하고 위험도를 정성적 혹은 반정량적으로 평가하는 기법이다. 위험 혹은 위험요소(Hazard)란 사고가 일어날 수 있는 조건 혹은 환경을 의미하며, 이 환경을 규정하는 어떤 요소가 통제를 벗어날 경우 사고(Accident)가 발생했다고 한다. 통제를 벗어난 사건(Event)을 원인(Cause)라고 부르며 이로 인한 사고는, 각 상황을 통제할 수 있는 위험도 제어수단(Risk Control Measure) 혹은 안전장벽(Safety Barrier)들이 성공적으로 작동하느냐에 따라, 다양한 규모(Severity)의 결과(Consequence)를 가져올 수 있다. 사고의 원인이 얼마나 자주 발생하는지 혹은 안전장치들이 높은 확률로 사고를 통제하느냐에 따라 각 결과가 발생할 빈도(Likelihood)도 통제할 수 있다. 어떤 원인에 의해 위험요소가 사고가 되고, 그 사고가 제어가 안되는 경우에는 점점 더 규모가 커지는 연쇄작용이 발생할 수 있다. 대부분의 사고 시나리오는 3단계로 구분하여 표현된다. 사고를 대표할 수 있는 사건을 대표사건(Top Event)이라 부르고, 대표사건 전에 발생하는 사건들을 원인(Cause)라고 부르며, 대표사건 후에 발생하는 사건들을 결과들(Consequences)이라 구분한다. 연쇄작용은 적절한 위험도 제어수단에 의해 다음 단계로 발달하는 것을 방지할 수 있다. 연쇄작용과 위험도 제어수단 식별을 마치고, 어떤 결과는 어떤 빈도로 발생하며 어떠한 규모가 될지 평가할 수 있으며 이를 위험도(Risk)라고 한다.

2.2 HAZID 분석 절차

본 연구에서는 국제표준규격(ISO 17776, 2002; ISO TR 15916, 2015)과 국내규격(KGS FP-216, 2022)의 HAZID 절차를 준용하였으며, 아래와 같은 순서로 진행하였다.

- 1) 대상 설비를 운용하는 시기를 구분하고 구조와 기능을 고려하여 분석 대상을 세분화(Itemize)한다.
- 2) 대상 설비의 운용과 설계 특성을 반영하는 지시어(Guide Word) 목록을 설정한다.
- 3) 각 분석 대상(Item)에 대하여 지시어를 적용하며 유관한 위험요소(Hazard)를 파악한다.
- 4) 각 위험요소의 원인(Cause)을 파악한다.
- 5) 위험요소가 실현될 경우의 사고결과들(Consequence)을 Fig. 1과 같이 논의한다. 이때 안전장치들이 효과를 발휘하지 못할 수 있는 가능성을 고려하여 최악의 상황이 어떻게 될 것인지를 파악한다.
- 6) 위험요소가 실현되는 것을 방지하거나 결과를 제어할 수 있는 안전장치들(Prevention and Control Measures)을 파악한다.
- 7) 다양한 사고결과 중 개연성이 있으면서도 최악의 결과

(Credible and Worst Consequence)를 선택한다.

- 8) 최악의 결과에 대해 발생 빈도(Likelihood)와 손상정도(Severity)를 평가하여 위험도(Risk)를 평가한다.
- 9) Risk Ranking은 Consequence에 대해 수행된다. 이 때 Consequence의 발생빈도는 아래 그림과 같이 Deviation 즉 Top Event의 빈도에 Control Measure가 발생빈도를 저감하는 효과 $x_j, j = 1, 2, \dots, N$ 을 고려하여 추정된다. Deviation의 발생빈도는 모든 Initiating Cause의 빈도와 Prevention Measure의 효과를 고려하여 계산한다.

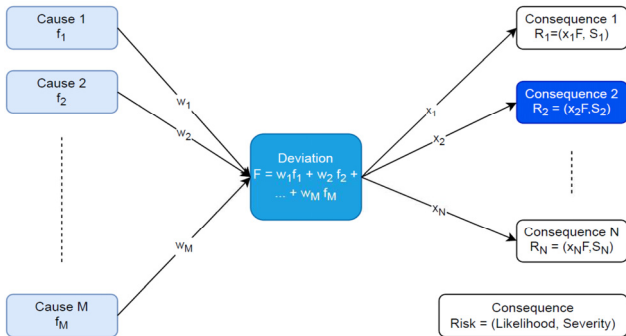


Fig. 1. Evaluation of Frequency of Occurrence of Consequences

- 10) 위험도를 더 정밀하게 평가할 필요와 방법 혹은 위험도를 줄일 수 있는 개선방안에 대해 논의하고 이를 권고 사항으로 기록한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 주요 위험요소 및 논의 내용

HAZID 주요논의 사항은 다음과 같다. 우선적으로 확산성이 매우 높은 수소를 폐쇄 공간에 배치함으로써 발생할 수 있는 위험요소에 대해 집중적으로 논의하였다. 밀폐공간에 대한 환기 설계의 중요성 및 위험요소, 수소의 낮은 점화에너지, 가스운 폭발에 의해 발생할 수 있는 높은 압력 등이 논의되었다. 환기를 위한 환기 덕트가 길고 충분한 환기용량을 확보하기 위해 유속이 비교적 빠르게 유지될 것이 예상되면, 수소 누출 시 환기덕트에서 생성된 정전기에 의해 점화가 될 수 있는 점이 제기되었다. 자연환기를 위해 천정에 경사를 주는 방법도 논의되었다. 밀폐공간에서 가스운 폭발이 발생하면 그 하중이 높아지고, 폭연이 폭발으로 바뀔 가능성이 높아질 수 있다는 점이 논의되었다.

정량적위험도평가(Quantitative Risk Assessment, QRA)를

Table 1. Improvement Recommendation of HAZID

Hazard	Improvement recommendation	Relevant event /barrier
LH2 leak in the cellar	R1.1 Consider performing QRA esp. w.r.t. risk of explosion in the confined space.	Event 5
	R1.2 Consider having a slanted roof to enhance H2 exhaust.	Event 5
	R1.3 Ensure that supports for equipment around probable LH2 leakage are not vulnerable to exposure to LH2. (Comment: Design and effects of bunds can be considered.)	Event 9
	R1.4 Check possibility of DDT and, if probable, evaluate an explosion design load that will be referred to impact absorption around the cellar. (Comment: Refer to NORSOK Z-013 for Design Accidental Load determination.)	Event 12
	R1.5 Check insulation around the LH2 tank.	Event 14
	R1.6 Provide redundant exit considering probable damage of the staircase	Event 17
	R1.7 Develop a method to prevent static electricity along the Vent duct.	Event 20
	R1.8 Consider developing a method to control vibration from rotating machinery.	Event 22
	R1.9 Evaluate possibility of developing static electricity along the vent and ignite GH2 being vented.	Barrier 4
	R1.10 Check adequacy of the ventilation capacity and design of the ventilation system w.r.t. possibility of ignition. (Comment: HVAC for equipment operation should be considered.)	Barrier 10
GH2 leak in the cellar	R3.1 Provide redundant exit considering probable damage of the staircase	Event 7
	R3.2 Consider developing a method to control vibration from rotating machinery.	Event 8
LH2 leak around tsnk lorry	R4.1 Consider designating a specific area in which LH2 leak can be controlled in a safe way.	Event 4
GW system failure	R5.1 Evaluate the possibility for GW HEX failure to introduce H2 into GW (Comment: Not all type of HEX allow mixing of two fluids.)	Event 3
	R5.2 Check vent design for the GW tank considering probable H2 contamination.	Event 4
Hazard during maintenance within the cellar	R6.1 Develop procedure to enclosed space entry and follow it.	Event 4
	R6.2 Develop safe access method for equipment for maintenance. Space around equipment or scaffolding for working on height.	Event 5

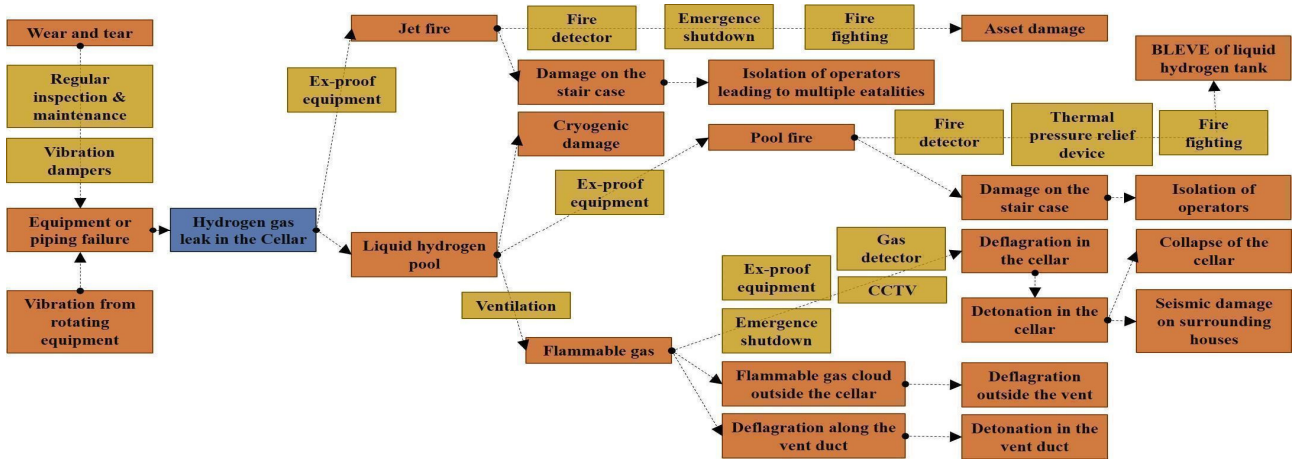


Fig. 2. Hydrogen Gas Leak in the Cellar of HAZID Diagram

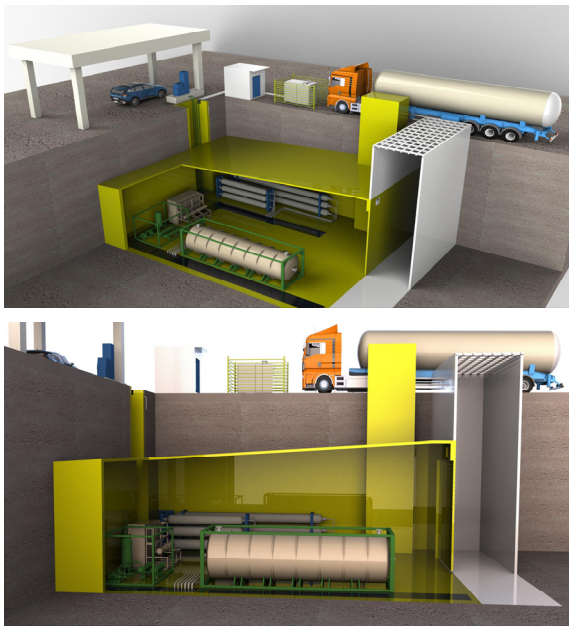


Fig. 3. Design Plan for Underground Liquid Hydrogen Refueling Station

수행하여, 위험도에 대한 체계적인 접근관리를 할 것을 권고 하였으며, 밀폐공간 진출입에 따른 위험요소, 사고 발생 시 고립의 위험성, 유지보수의 가능성/편의성 등을 논의하였다. 유틸리티의 고장으로 충전소 전체가 운영이 중단될 수 있으며, 열교환기의 고장 등은 화재/폭발 사고로 이어질 수도 있다. 유틸리티 설계에 고려해야 할 사항으로는 진동 제어와 냉각수(Glycol Water)에 섞인 수소의 처리가 논의되었다.

3.2 권고 사항

위에 나타낸 Table 1과 같이 총 7가지의 사고시나리오 중에 17개의 권고사항이 제시되었으며, 환기 덕트에 발생할 수 있는 정전기 관리와 여분의 탈출구 확보 등은 중복된 내용이지만 별도의 Event 혹은 Barrier에 적용되었기에 유지

하였다. 각 권고사항은 프로젝트 관리 항목으로 등재되어 정기적이고 체계적으로 검토되고 최종상태는 문서로 작성 되어 프로젝트가 종료될 시점에 위험도가 어떤 수준을 갖게 되었는지 확인할 수 있도록 해야 한다.

3.3 HAZID 다이어그램

지하 액화수소충전소의 대표 사고 시나리오를 지하 공간에서 액화수소 누출(Hydrogen Gas Leak in the Cellar), 환기 시스템 고장(Ventilation System Failure), 액화수소 탱크 주변에서의 액화수소 누출(Hydrogen Gas Leak around Tank Lorry), 글리콜 시스템을 대표로 설정하였다. Fig. 2와 같이 진동이나 고장으로 기체 수소가 누출되게 되면 즉시 점화에 의해서 제트화염이 발생하거나 지연점화로 인하여 VCE 사고가 발생하게 된다. 액체 수소의 경우에는 누출 시 지면에 흐르게 되고 빠르게 기화되면서 VCE 사고가 예상되며, 지면에 흐른 상태에서 점화가 되는 경우에는 액면화재가 발생할 수 있다. 심각한 경우의 폭발사고는 폭연에서 폭발로 이어져서 구조물의 붕괴도 예상이 되며, 액화 용기에 화재로 인한 충분한 열량이 공급되면 BLEVE 사고로 이어질 수 있다.

3.4 지하 액화수소충전소 설계(안)

Figs. 3, 4는 지하 액화수소충전소의 3D 이미지와 P&ID이다. 극저온의 액화수소로부터 설비를 보호하고 안정적으로 운영하기 위해서 글리콜 워터를 사용하고, 압축과정에서 온도가 올라가기 때문에 이를 냉각시키기 위해서 냉각기를 사용하고 있다. 글리콜 워터 펌프와 용기가 한 구역에 구성되고 액화수소 가압을 위한 압축기와 냉각을 위한 열교환기가 한 유닛으로 구성되어 있다. 액화수소 용기에서 나온 수소는 압축기를 이용하여 승압하여 저압탱크(40 MPa)에 저장 이 되며, 다시 승압하여 고압탱크(82 MPa)에 저장하게 되고 지상의 수소 차량에 충전기(82 MPa)를 통해서 충전하도록 되어 있다. 냉각기는 수소가스를 냉각시키는 역할을 하지만 자체로는 폭발 위험을 갖고 있지 않기 때문에 방폭 구역에

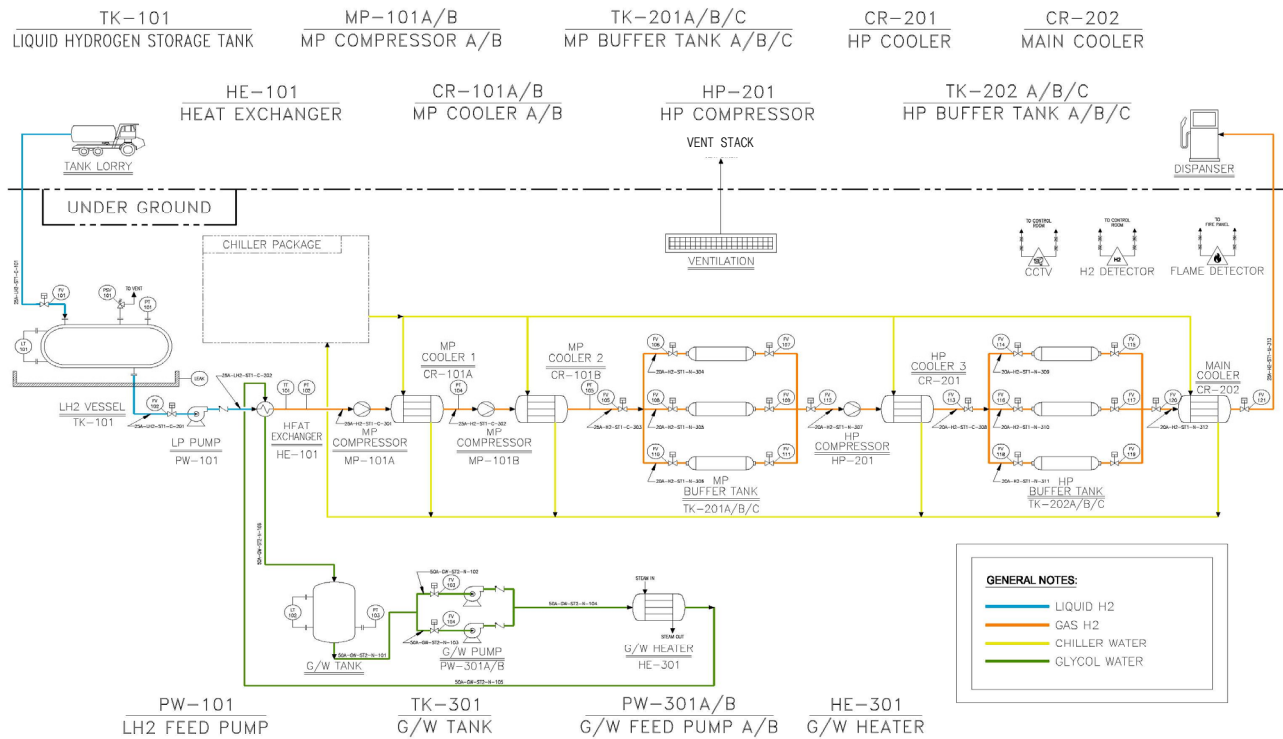


Fig. 4. P&ID (Process and Instrument Diagram) of Underground Liquid Hydrogen Refueling Station

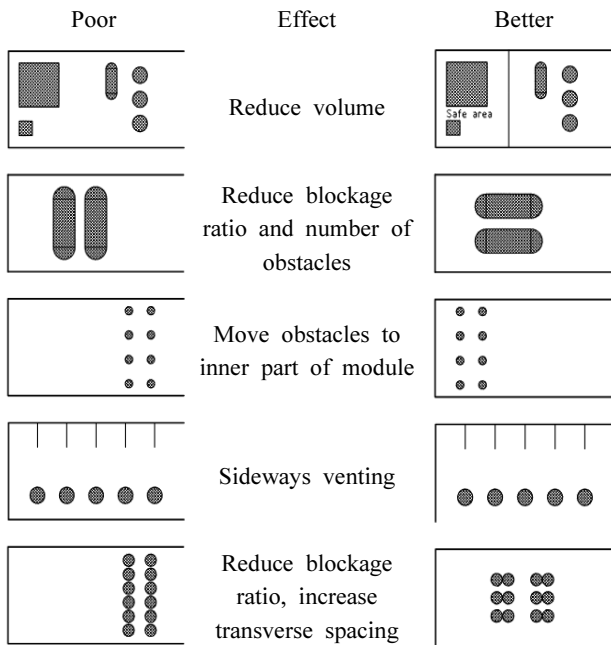


Fig. 5. Effect of Layout on Explosion Severity

포함 시키지 않아도 된다. 수소충전소의 주요 설비가 반밀폐 공간에 배치되면서 폭발 사고가 발생할 수 있으며, 위험을 경감하기 위하여 환기의 역할이 주요하여 주요 배관은 환기 통(Vent Stack)과 연결하여 지하 공간 내에서 수소 누출사고

가 발생한 경우에 수소가스를 빠르게 상부로 보낼 수 있도록 설계하였다.

반 밀폐 공간 내에 발생한 폭발은 설비 등의 배치에 따라 그 위험성은 큰 차이를 보이기 때문에 반드시 각종 설비의 배치에 따른 위험성을 고려해야 된다. 따라서 본 지하 액화수소충전소를 구성하는 각종 설비 및 장비들의 배치는 ISO 13702 (1999)에 제시된 방법(Fig. 5)을 고려하여 설계하였다.

4. 결론

대용량의 액체수소 저장탱크 및 고압의 기체수소를 다루는 장비를 지하에 설비함으로써 발생할 수 있는 위험요소를 개념적으로 논의하였다. 밀폐공간으로서 엄격한 진출입 절차를 수립하고 따라야 한다. 작업환경 및 장비 운용환경을 확보하기 위해 환기 및 온습도 제어 등이 필요한데, 이를 위한 환기시설이 추가의 위험을 가져오지 않도록 적절히 설계되어야 한다. 밀폐공간에서 가스온 폭발압이 발생하며 그 강도가 높아질 가능성이 높으므로 이에 대해서도 체계적인 검토가 필요하다. 본 연구를 통해 생성된 17개의 권고안을 모든 프로젝트 팀이 검토하고 이해함으로써 안전한 설계안을 도출하고 적절한 안전장치들을 확보할 수 있도록 노력해야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 한국건설기술연구원 연구운영지원비지원(주요사업)사업으로 수행되었습니다(과제번호 20240176-001, 수소도시 기반시설의 안전 및 수용성 확보기술 개발).

References

- Fusaro, R., Vercella, V., Ferretto, D., Viola, N., and Steelant, J. (2020). Economic and environmental sustainability of liquid hydrogen fuel for hypersonic transportation systems. *CEAS Space Journal*, Vol 12, pp. 441-462.
- ISO 13702. (1999). *Petroleum and natural gas industries – Control and mitigation of fires and explosions on offshore production installations – Requirements and guidelines*.
- ISO 17776. (2002). *Petroleum and natural gas industries Offshore production installations Guidelines on tools and techniques for hazard identification and risk assessment*.
- ISO TR 15916. (2015). *Basic considerations for the safety of hydrogen systems*.
- Jossie, E.G., and Daniela, B.M. (2024). From fossil fuel energy to hydrogen energy: Transformation of fossil fuel energy economies into hydrogen economies through social entrepreneurship. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 54, pp. 574-585.
- KGS FP-216. (2022). *Facility/Technical/Inspection Code for Fuel Vehicles Refueling by Type of On-Site Hydrogen Production*.
- Kizer Energy. (2023). *What-If?, HAZID, and HAZOP Identification Techniques*. (02.10.2024). Retrieved from <https://kizerenergy.com/news/What-If-HAZID-and-HAZOP-Identification-Techniques>
- Ministry of Trade, Industry and Energy. (2023). *Korea Hydrogen Roadmap 2.0*. from https://www.motie.go.kr/motie/ne/presse/press2/bbs/bbsView.do?bbs_seq_n=167182&bbs_cd_n=81¤tPage=1&search_key_n=&cate_n=&dept_v=&search_val_v=
- Park, B., Kim, Y., Paik, S., and Kang, C. (2021). Numerical and experimental analysis of jet release and jet flame length for qualitative risk analysis at hydrogen refueling station. *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 155, pp. 145-154.
- Park, B., Kim, Y., Paik, S., Park, J., and Lim, O. (2023). Jet Flame Risk Analysis for Safe Response to Hydrogen Vehicle Accidents. *Sustainability*, Vol. 15, No. 13, pp. 1-13.
- Park, B., and Kim, Y. (2023). Reenacting the hydrogen tank explosion of a fuel-cell electric vehicle: An experimental study, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48, No. 89, pp. 34987-35003.
- Sigma-HSE. (2023). *HAZOP vs HAZID Studies: Understanding the Differences*. (02.10.2024). Retrieved from <https://sigma-hse.com/news-insights/hazid-hazop-differences/>
- The CPD Certification Service. (2023). *HAZID and HAZOP a Brief Comparison*. (02.10.2024). Retrieved from <https://cpduk.co.uk/news/hazid-and-hazop-a-brief-comparison>
- Yoo, B., Wilailak, S., Bae, S., Gye, H., and Lee, C. (2021). Comparative risk assessment of liquefied and gaseous hydrogen refueling stations. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 46, pp. 355511-35524.

Received	April 26, 2024
Revised	April 29, 2024
Accepted	May 9, 2024